

Vorhersage der prozessinduzierten Verformung von Kohlenstofffaserhalbzeugen nach der Komprimierung

Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress - Online -
01.09 – 03.09.2020

Björn Denker M.Sc.

DLR e.V. - Institut für Faserverbundleitbau
und Adaptronik



Wissen für Morgen



Agenda

- Motivation
- Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse aus meinem DLRK Beitrag von 2018
- Aufstellen eines Materialmodells
- Darstellen des Validierungsprüfstand und der Versuchsdurchführung
- Versuchsauswertung
- Fazit und Ausblick



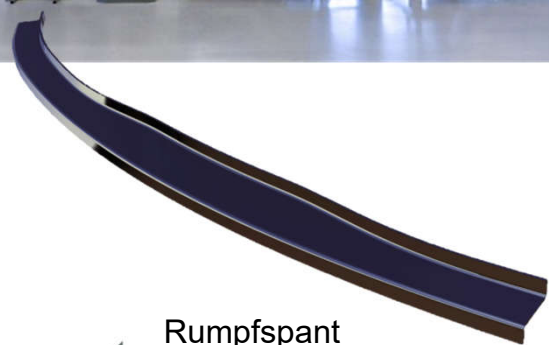
Motivation

EVo-Projekt:
Automatisierte RTM-
Pilotanlage für
Rumpfspante
(2010 - 2015)

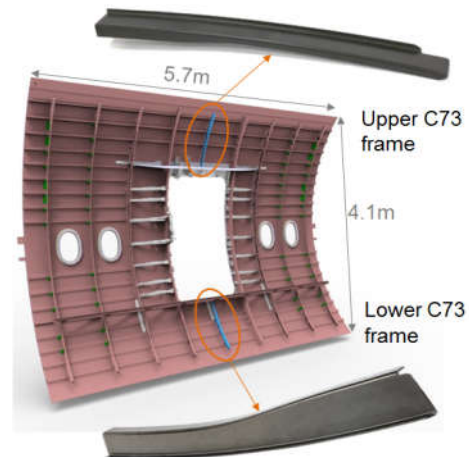
MAAXIMUS:
Automatisiertes
Preforming von
Türumgebungsspanen
(2016 - 2017)

Komprimierungs-
analyse von
flachen Preforms
(ab 2017)

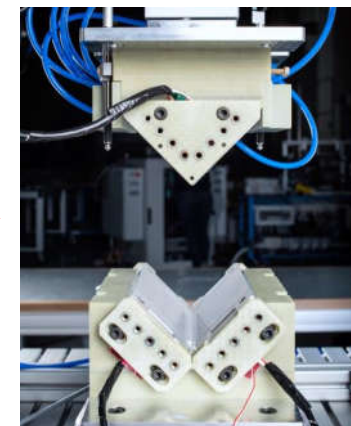
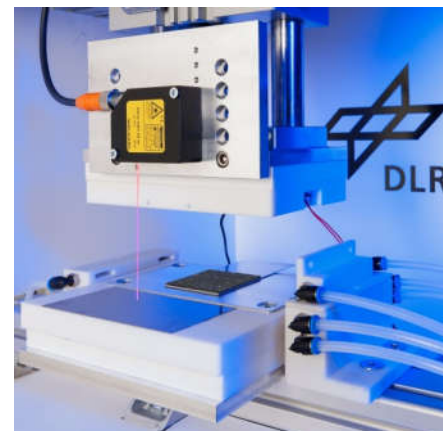
Komprimierung
von winkligen
Profilen
(ab 2019)



Rumpfspant
(Länge ~ 2m)



Deformierter Preform
(Werkzeugwinkel = 90°;
Preformwinkel > 90°)



Zusammenfassung von DLRK Beitrag aus 2018

Automatisierte, endkonturnahe RTM-Fertigung – Analyse des Komprimierungsverhaltens als wesentlicher Beitrag zur Steigerung der Prozessstabilität

Björn Reinhard M.Sc.

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, DLR e.V.
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP), Stade

Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018
Friedrichshafen, 04.-06.09.2018



Zusammenfassung von DLRK Beitrag aus 2018

Automatisierte, endkonturnahe RTM-Fertigung –

Anal Geometrie des ausgehärteten Bauteil und des Preforms

Beit

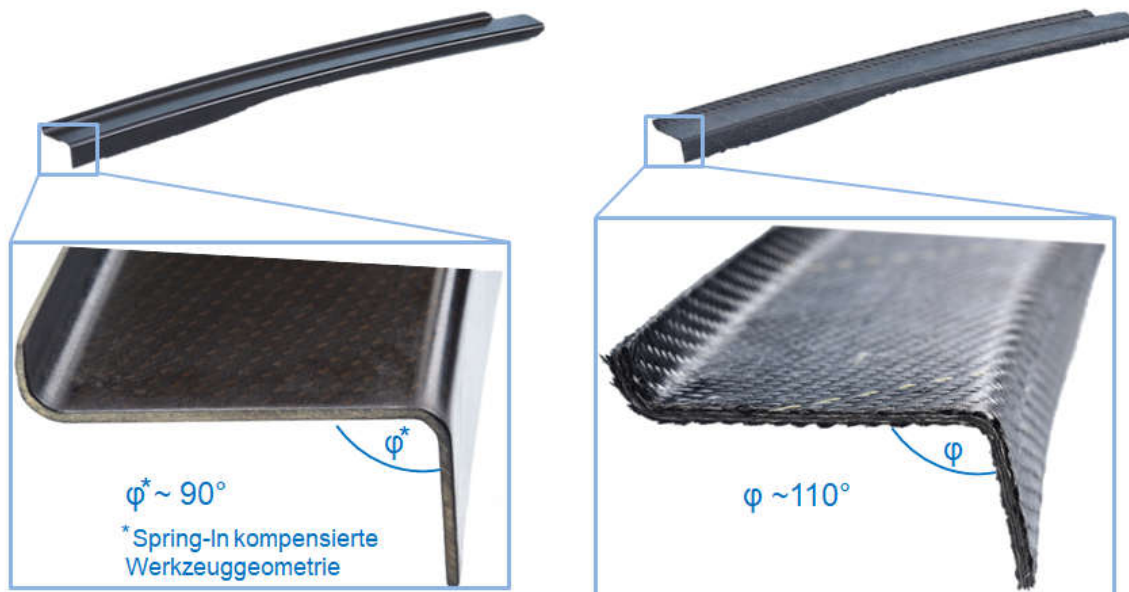
Björn

Institu

Zentru

Deuts

Friedr



[KAP2016]



Zusammenfassung von DLRK Beitrag aus 2018

Automatisierte, endkonturnahe RTM-Fertigung –

Anal Geometrie des angehängten Bauteils und des Preforms

Beit

Einflussparameter für die Preformrelaxation

Björn

Institu
Zentru

Deuts
Friedr



Bauteil

- Lagenanzahl
- Lagenaufbau
- Winkel
- Radius
- ...

Material

- Faserart
- Nähart
- Binder
- ...

Prozess

- Druck
- Temperatur
- Prozesszeit
- Zyklen
- ...



Zusammenfassung von DLRK Beitrag aus 2018

Automatisierte, endkonturnahe RTM-Fertigung –

Anal Geome

Beit Einflussparameter für die Preformrelaxation

Björn

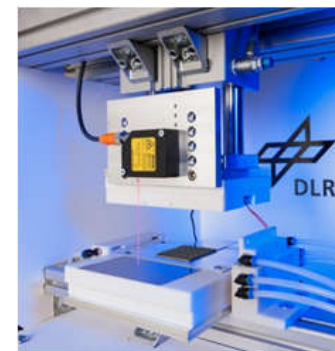
Institu
Zentru

Deuts
Friedr

Praktische Untersuchungen – Vorliegende Testvorrichtungen

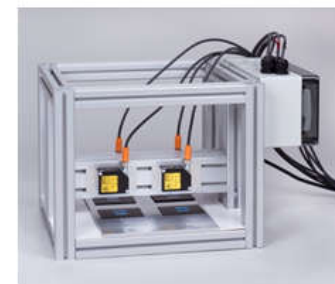
- Komprimierung und Aufnahme der Dickenänderung des Preforms mithilfe eines Komprimierungsprüfstandes

- Druck: 0,5 – 5 bar
- Temperatur: bis 180°C
- Abstandsmessung: Laser (kontinuierlich)
- Kraftmessung: Integrierte Kraftmessdose



- Nachgeschaltete Langzeitbetrachtung des Relaxationsvorganges mithilfe einer Langzeitversuchsvorrichtung

- Größe der Prüffläche: 240mm x 300mm
- Anzahl der Prüfplätze: 4
- Abstandsmessung: Laser (kontinuierlich)



[KAP2016]



Zusammenfassung von DLRK Beitrag aus 2018

Automatisierte, endkonturnahe RTM-Fertigung –

Anal
Beit

Geome

Einflussparameter für die Preformrelaxation

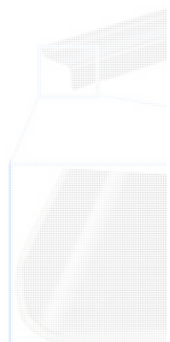
Björn

Prä
Tes

Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Institu
Zentru

Deuts
Friedr



$\psi \sim$
Spi
Wei

[KAP2016]

• Kor
des
Kor

• Zusammenfassung:

- Bei der Verarbeitung von trockenen, bebinderten Fasermaterialien liegt infolge der Relaxation ein hohes Prozessrisiko vor (vor allem bei automatisierten Prozessen)

- Eine Vorhersage des Preformzustandes ist zwingend erforderlich

- Keines der getesteten Materialien weist einen Faservolumengehalt von 58% und einen Relaxationsgrad von 0 auf

• Na
Rel
Lar

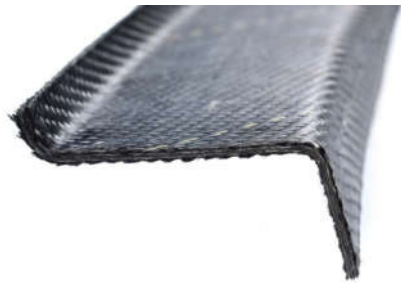
• Ausblick:

- Aufstellen der Übertragungsfunktion
- Realisierung eines L-Winkel Prüfstand zur Validierung der Übertragungsfunktion



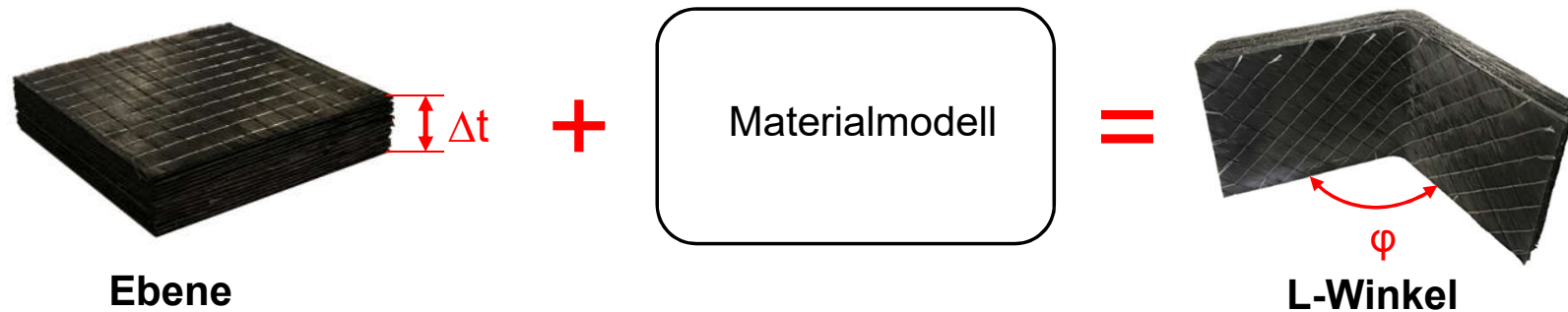
Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

- Nach der Komprimierung erhöht sich die Preformdicke infolge von Rückfederungseffekten
 - Eine Dickenerhöhung der Schenkel von winkligen Profilen bewirkt eine geometrische Verformung
 - Das Komprimierungs- und Relaxationsverhalten ist von den Material- und Prozessparametern abhängig
 - Aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren existiert ein allgemeingültiges Ersatzmodell für die ebene Komprimierung von Kohlenstofffaserpreforms noch nicht
- Vorstellung eines Modells zur Vorhersage der geometrischen Preformverformung auf Basis der Material- und Prozessparametern



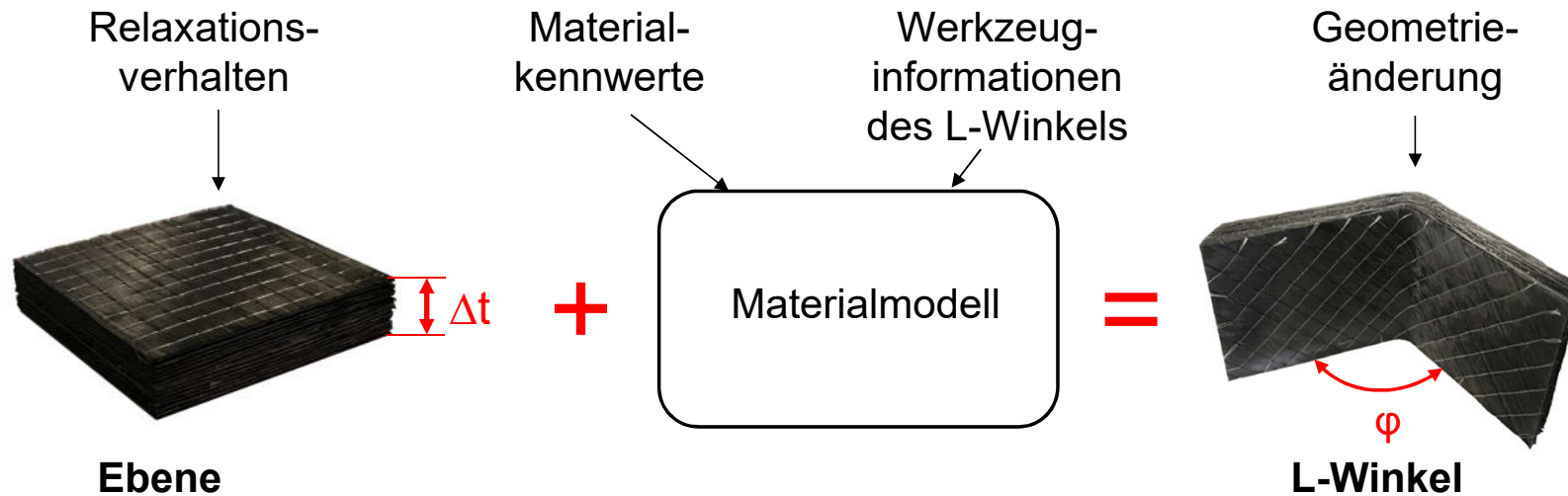
Anforderungen an ein Vorhersagemodell

- Berücksichtigen der prozess- und materialspezifischen Parameter im Modell
 - Abbilden der Winkelvorsage über ein einfaches Materialmodell
 - Geringer Zeitaufwand für die Bestimmung der Materialcharakteristik
 - Geringer Kapitaleinsatz (z.B. keine teuren Winkelwerkzeuge)
-
- Ansatz:
 - Winkelvorsage stammt aus Informationen der ebenen Komprimierung und dem Materialmodell



Gewählter Ansatz

- Formänderungsenergieansatz
 - Verknüpfung der Relaxation von ebenen Preforms mit der bei winkligen Preforms
- Input für das Modell:
 - Komprimierte und relaxierte Dicke im ebenen Zustand
 - Materialkennwerte aus Datenblättern der Materialhersteller
 - Geometrieinformationen des L-Winkelwerkzeuges (Winkel, Radien)



Vorhersagemodell

- Informationen aus der ebenen Komprimierung

$$W_2 = \int_{s_R}^{s_K} F(f(s)) ds \quad [1]$$

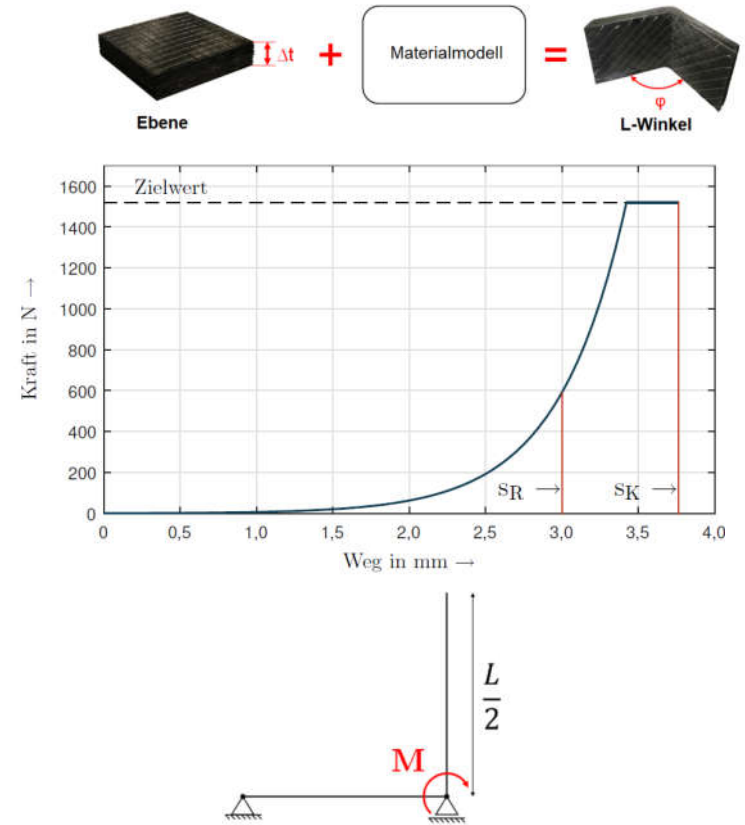
mit s_K = Strecke bei Komprimierung
 s_R = Strecke nach Relaxation

- Ersatzmodell des winkligen Preforms über L-Winkel-Träger

$$W_{mod} = \frac{M^2 L}{12EI} \quad [2]$$

- Formänderungsenergieerhaltung zwischen ebenen und winkligem Preform (gleichsetzen von [1] und [2])

$$M = \sqrt{\frac{12EI}{L} \cdot \int_{s_R}^{s_K} F(f(s)) ds} \quad [3]$$



Vorhersagemodell



- Schenkelwinkel über Satz von Castigliano

$$\varphi = \frac{\partial W_{mod}}{\partial M} = \int_0^{\frac{L}{2}} \left[\frac{M_1}{EI} \frac{\partial M_1}{\partial M} \right] dx$$

- Mathematisches Vorhersagemodell

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{L}{EI} \cdot \int_{s_R}^{s_K} F(f(s)) ds}$$

Preformwinkel

Flächenträgheitsmoment
während der Komprimierung

E-Modul, bestimmt durch klassische Laminattheorie

Relaxationsverhalten, bestimmt aus
ebenen Versuchen



Vorhersagemodell



$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{L}{EI} \cdot \int_{s_R}^{s_K} F(f(s)) ds}$$

φ : Preformwinkel
 E : E-Modul, bestimmt durch klassische Laminattheorie
 I : Flächenträgheitsmoment während der Komprimierung
 $F(f(s))$: Relaxationsverhalten, bestimmt aus ebenen Versuchen

- Anwenden der klassischen Laminattheorie zum Einbringen der Materialeigenschaften in das Modell
 - Annahmen für das Ersatzmodell:
 - Die Einzellagen sind perfekt miteinander verklebt
 - Der Binder wird als schwaches Matrixsystem mit eingerechnet (1%)
 - Ziel der Anwendung:
 - Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Materialien mit verschiedenen Lagenaufbauten über den errechneten E-Modul



Versuchsmatrix



- Allgemeine Informationen zu den getesteten Materialien
 - Maschinell hergestellte Kohlenstofffasergelege mit gleicher Binderart

	Material1	Material2	Material3	Material4
Anzahl Einzellagen	3	2	2	2
Ausrichtung	[45/-45/0]	[0/90]	[0/90]	[45/-45]
Flächengewicht [g/m ²]	500	478	478	595
Bindermenge [g/m ²]	16	19	20	24
Toughenermenge [g/m ²]	12	8	-	-
Elastizitätsmodul k [GPa]	290	265	265	255

- Variation von 11 Abstufungen bei den Elastizitätsmodulen zwischen 30207 und 85128 MPa

	Material1	Material2	Material3	Material4
Hocher E-Modul	77793	85128	68667	64757
Mittlerer E-Modul	47906	58869	46718	54747
Tiefer E-Modul	30207	38488	38488	41572



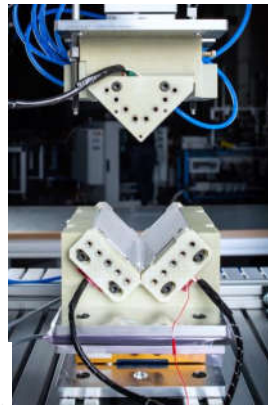
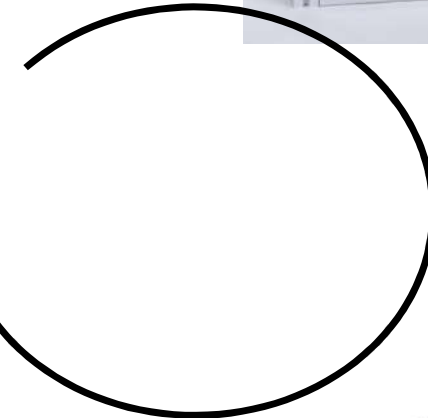
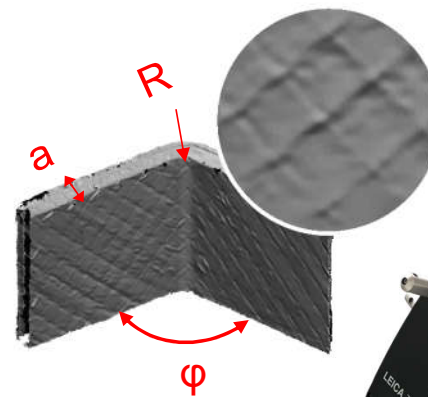
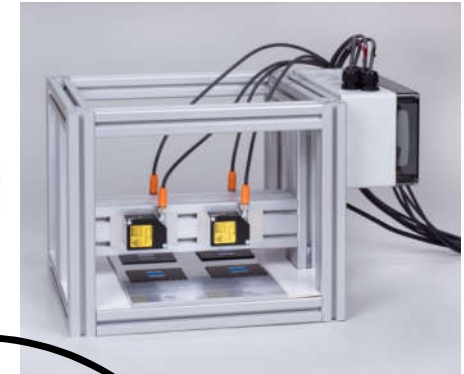
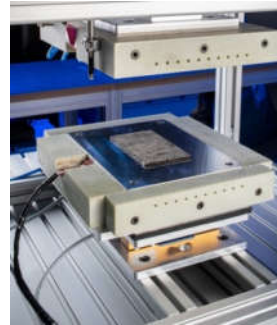
Validierungsprüfstand

- Prüfplatz für ebene Komprimierung
- Prüfplatz für winklige Komprimierung
- Pneumatische Kraftaufbringung bis 2kN
- Kraftregelung über Kraftmessdose
- Temperaturregelung über Temperatursensoren im Werkzeug
- Kontinuierliche Preformdickenmessung
- SPS gesteuerter Prozessablauf

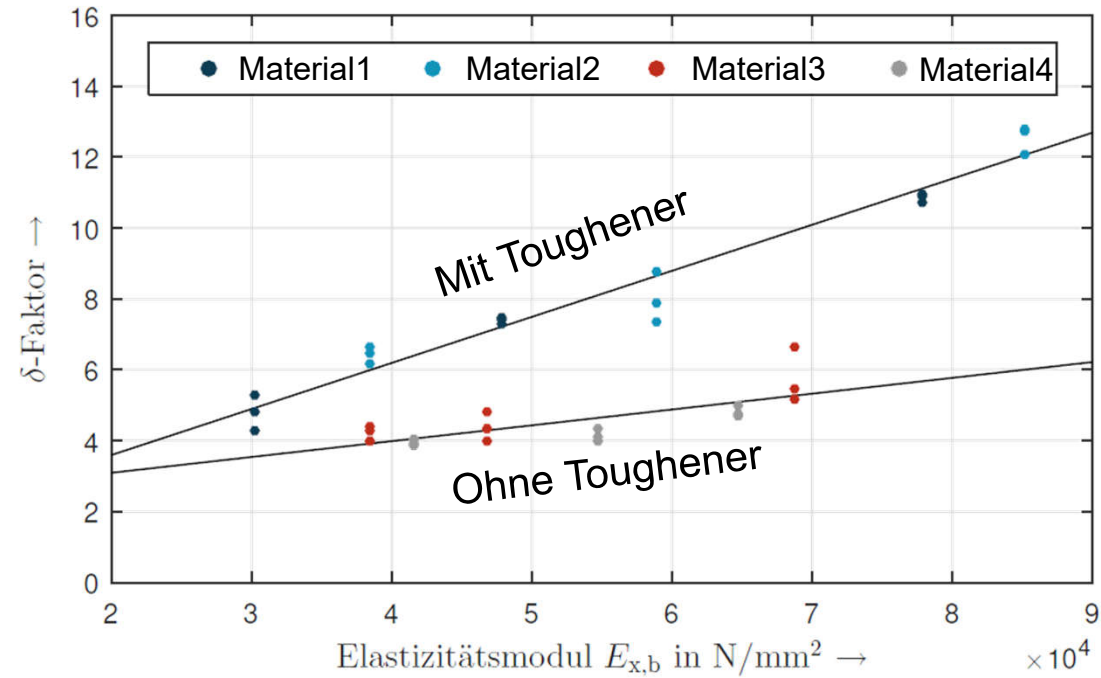
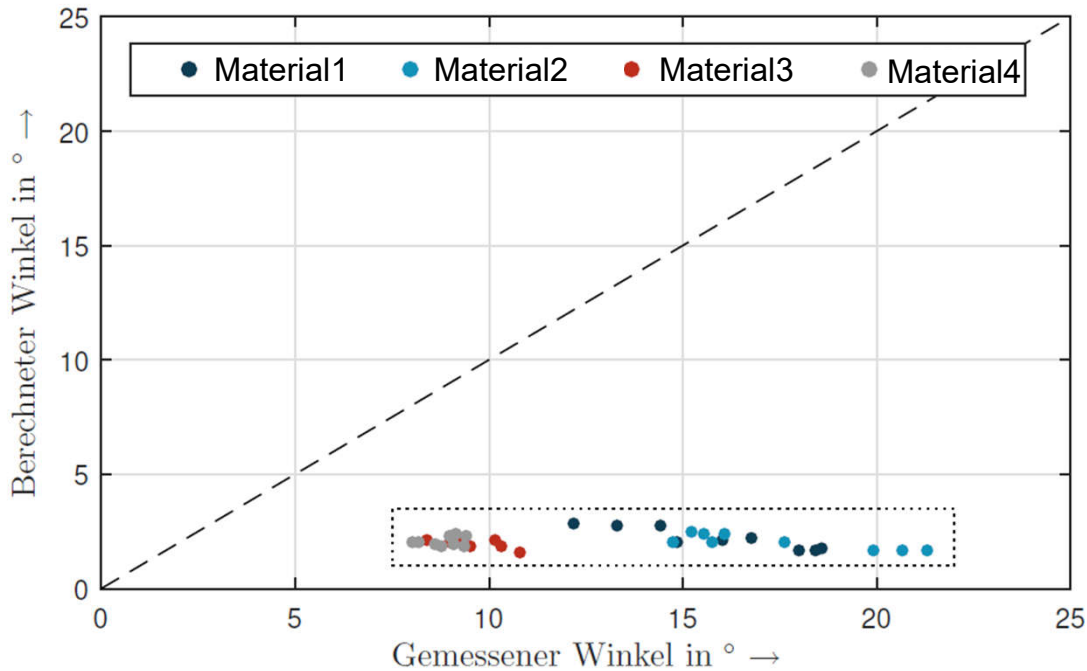


Versuchsdurchführung

- 1. Komprimierung von ebenen Preforms
- 2. Dickenmessung der Preforms nach der Komprimierung mit Laserabstandssystem
- 3. Komprimierung von winkligen Preform mit Prozessparametern aus 1.
- 4. Laserlichtschnittscan und Geometrieanalyse
 - Schenkeldicken a
 - Winkel φ
 - Radien R
- 5. Anwenden des aufgestellten Ersatzmodells



Validierung des Vorhersagemodells

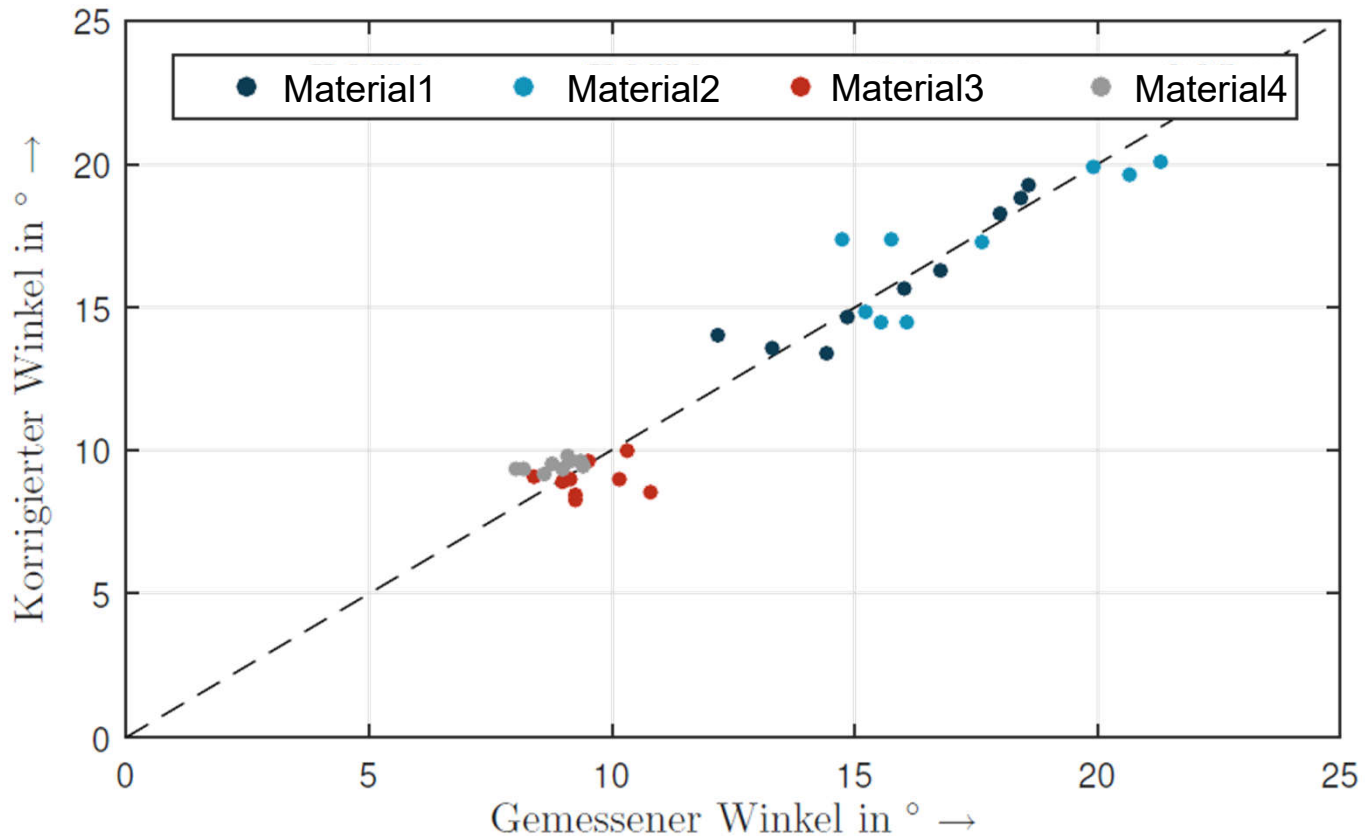


- Die Notwendigkeit eines Korrekturfaktors war auf Grund der Verwendung der klassischen Laminattheorie vorhersehbar
- Zwei Interpolationsgeraden beschreiben den Korrekturfaktor δ in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul
- Der Korrekturfaktor ist abhängig von der Verwendung von Toughener



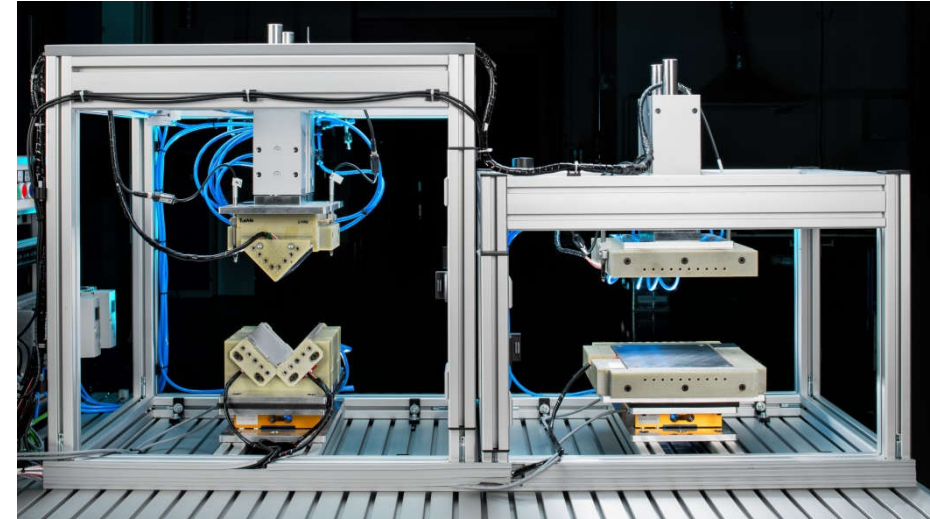
Validierung des Vorhersagemodells

- Korrigieren der berechneten Werte für die Materialien mit und ohne Toughener mit dem Korrekturfaktor
- Durchschnittliche Abweichung des Vorhersagemodells liegt bei 6,1% (entspricht $0,8^\circ$)

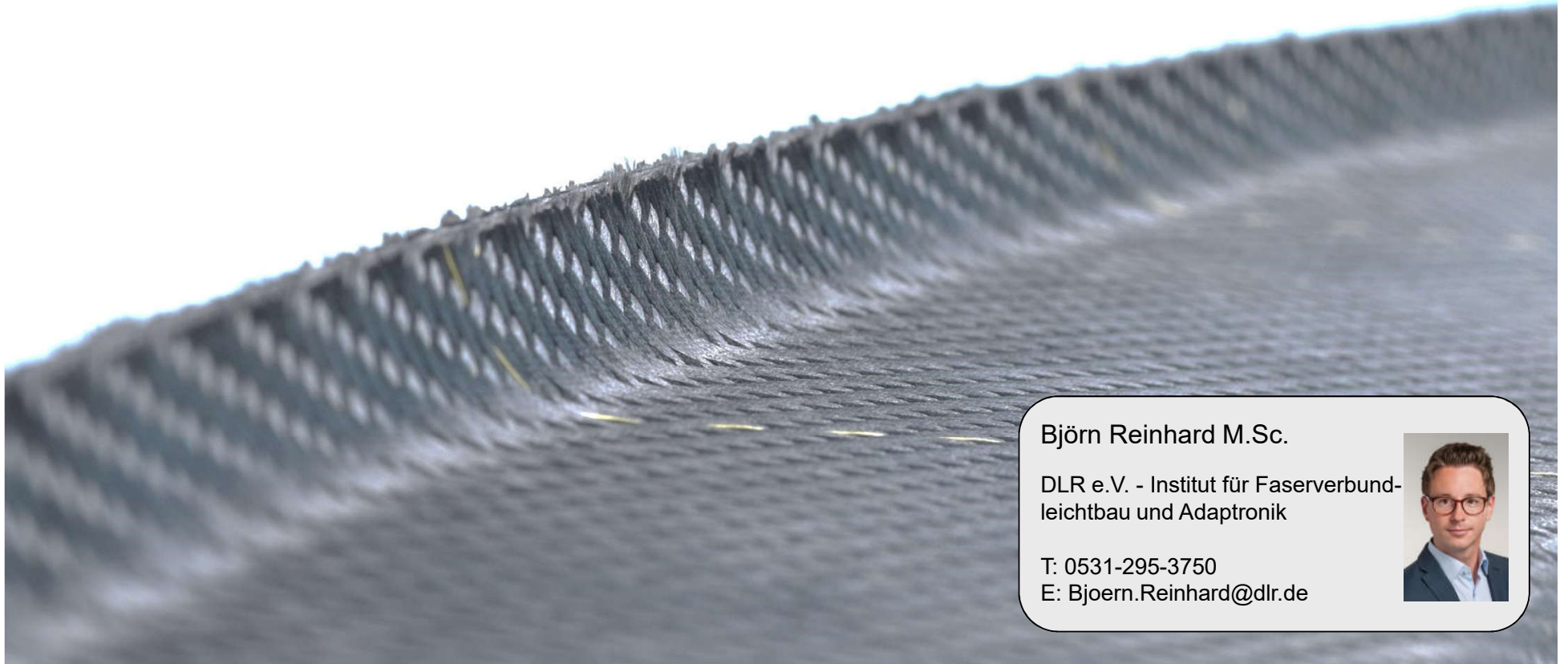


Fazit und Ausblick

- Fazit:
 - Ein Prüfstand und eine Testmethodik wurden realisiert und validiert
 - Eine Vorhersagemodell für winklige Preforms wurde entwickelt sowie an vier unterschiedlichen Materialien und variierenden Lagenaufbauten validiert
- Ausblick:
 - Anwenden von Ansätzen des maschinellen Lernens zur Erstellung von Ersatzmodellen für die ebene Preformkomprimierung
 - Rücktransfer der erarbeiteten Modelle und Erkenntnisse in die Fertigung von Demonstrationsbauteilen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Björn Reinhard M.Sc.

DLR e.V. - Institut für Faserverbund-
leichtbau und Adaptronik

T: 0531-295-3750

E: Bjoern.Reinhard@dlr.de

